

東北大学 川島彩貴* 古林敬顕 中田俊彦

食料とエネルギーの需給を持続可能、安全かつ安定に実現するためには、それらの需給システムを統合デザインする必要がある。そのために、まず現状の需給システムの特性を正確に表現し、持続可能なシステムへの移行方法と課題を具体化することが必要である。そこで本研究は、食料供給とエネルギー供給の相互関係を定量的に分析して、持続可能な需給システムの設計に必要な関係やエビデンスを示すことを目的とする。評価にあたり、食料とエネルギーの統合フロー図を作成する。これは、食料の生産から消費に至る一連の流れとその工程で消費されるエネルギーを図示したものである。熱量の単位に統一して作成した。フロー図の特性を分析した結果、年間の世界の食料のサプライチェーンにおける食料ロス¹は 10 EJ であり、食料ロスは、世界の一次エネルギー供給量 574 EJ の 1.7%、食料消費量の 3 分の 1 に相当することがわかった。また、食料由来のバイオ燃料は年間 2.7 EJ 生産されており、これは世界の一次エネルギー供給量の 0.5% を占めた。一次産業と食品加工における最終エネルギー消費は計 15 EJ、一次エネルギー換算すると 21 EJ で、これは世界の一次エネルギー供給量 574 EJ の 3.7% を占めている。日本の一次産業と食品加工における一次エネルギー供給量 44×10^2 EJ は、総供給量 18.5 EJ の 2.4% を占めた。日本の食料生産量は 26×10^2 EJ であるのに対し、輸入量は 61×10^2 EJ であり、輸入量は生産量の 2.4 倍に及ぶ。世界全体の合計の輸入量に占める日本の輸入量の割合は 4.5% である。フードチェーンにおけるエネルギー消費のデータの捕捉率を高めるには、流通時や家庭部門でのエネルギー消費量に加えて、農業用肥料製造に伴う間接エネルギーの定量把握が必要となる。

In order to design a sustainable, safety and secure supply-demand system for both food and energy, it's necessary to understand the current supply-demand system and to concretize methods and issues for understanding the system. Therefore, this research aims to show the data and relationships for designing a sustainable supply-demand system by quantitatively analyzing the correlation between food and energy. Analytical method includes an integrated flow diagram of food and energy. This shows series of flows from food production to consumption and the energy consumed in the process. As a result of the analysis, the food loss in the world food supply chain reaches 10 EJ annually, and food loss is found to be 1.7% of the world's total primary energy supply 574 EJ, equivalent to one-third of food consumption. Moreover, biofuels from food are produced 2.7 EJ, which accounted for 0.5% of the world's total primary energy supply. The final energy consumption in the primary industry and food processing is 15 EJ and total primary energy supply is 21 EJ, which is accounted for 3.7% of the world's total primary energy supply of 574 EJ. In Japan, total primary energy supply in primary industry and food processing 44×10^{-2} EJ accounts for 2.4% of total supply 18.5 EJ. While Japan's food production is 26×10^{-2} EJ, the import is 61×10^{-2} EJ, and the import is 2.4 times the production. The ratio of Japanese imports to total imports of the world is 4.5%. In order to consider all the energy consumption in the food chain, it is necessary to investigate energy consumption at the time of distribution, residential and indirect energy such as production of fertilizer.

1. 緒言

日本は、食料自給率 38% (熱量ベース) (2016 年) ^[1]、エネルギー自給率 6% (2014 年) ^[2]と資源を輸入に依存している。それに伴って、国外の情勢による価格変動の影響を大きく被ること、キャッシュの流出、食料に関して一次産業の従事者の減少および荒廃農地の増加といった問題がある。また、世界においても、持続可能な開発目標 (SDGs) において資源の持続可能な消費と生産のパターンの確保は重要な目標のひとつとなっている。持続可能で安全かつ安定した食料とエネルギーの需給システムの統合デザインとその実現のためには、現状の需給システムを正確に表現し、持続可能なシステムへの移行方法と課題を具体化することが必要である。

そこで本研究は、食料供給とエネルギー供給の相互関係を定量的に分析して、持続可能な需給システム設計する際に必要となる関係やエビデンスを示すことを目的とする。食料とエネルギーの持続可能な利用を探究するためには、それぞれの持続可能性を考えるだけでなく、2つの資源の関係を考慮する必要がある。たとえば、フードチェーンにおけるエネルギー消費や、食料系バイオマスのエネルギー利用のように、一方の資源の利用が別の資源に影響を及ぼす関係がある。人口増大や経済発展に伴って、食料とエネルギーの需要が一層拡大していくと予想されており、加えて、気候変動の影響は、資源間のトレードオフを加速させる。ネクサスの分析により、ひとつの資源のみの分析では把握できない課題や現象を表現して、持続可能な社会をめざす。世界と日本を分析対象とし、それぞれの特性に加えて、日本の世界における位置づけを明らかにする。

2. 分析手法

食料とエネルギーのマテリアル・エネルギーフロー図を示し、それぞれの現状の需給システムを分析する。マテリアル・エネルギーフロー図は、食料及びエネルギーの生産から消費に至る一連の流れを図示したものである。作成する図は、食料とエネルギーの統合フロー図であり、これは、食料のマテリアルフロー図と、食料のサプライチェーンにおいて消費されるエネルギーのフロー図を統合したものである。熱量ベース (EJ) で作成する。

2.1 食料のマテリアルフロー図の作成手法

フロー図の作成には Food Balance Sheets ^[3]を参照する。生産量・輸出入量・在庫の増減量・国内消費仕向量とその内訳は統計値である。砂糖類、植物油、アルコール飲料は加工用食品から生産されるとする。また、肉類、臓物、動物油脂、卵、牛乳および乳製品については飼料用の食料から生産されると仮定する。国内消費仕向量は国内生産量+輸入量-輸出量-在庫の増加量 (又は+在庫の減少量) によって算出される。

食料ロス、Global food losses and food waste ^[4]を参考にして推計する。プロセスごとに食料損失と廃棄の割合を用いて算出する。図 1 に本研究で想定するフードサプライチェーンを示す。推計方法をプロセスごとに以下の式(1)から式(5)に示す。

・ Production (生産)

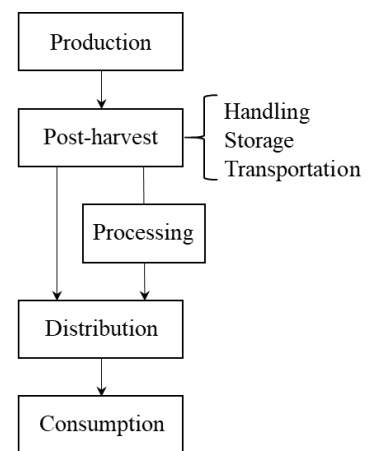


図 1 本研究で想定するフード
サプライチェーン

$$L_{\text{World, Production}} = \sum_g \sum_i \left(\frac{R_{g,i, \text{Production}}}{1 - R_{g,i, \text{Production}}} \times Q_{g,i, \text{FBS_Production}} \right) \quad (1)$$

L : 食料ロス・廃棄 [t/year]

R : 廃棄量の割合 [-]^[4]

Q : 食料の量 [t/year]^[3]

g : 文献^[4]上の地域グループ

i : 文献^[4]上の品目グループ

FBS : Food Balance Sheets 上の数値の意

・ Post-harvest (収穫後処理)

$$L_{\text{World, Post-harvest}} = \sum_g \sum_i (R_{g,i, \text{Post-harvest}} \times Q_{g,i, \text{FBS_Production}}) \quad (2)$$

・ Processing (加工)

$$L_{\text{World, Prodcessing}} = \sum_g \sum_i (R_{g,i, \text{Processing}} \times Q_{g,i, \text{FBS_Processing}}) \quad (3)$$

・ Distribution (流通)

$$L_{\text{World, Distributi on}} = \sum_g \sum_i (R_{g,i, \text{Distributi on}} \times Q_{g,i, \text{FBS_Food}}) \quad (4)$$

・ Consumption (消費)

$$L_{\text{World, Consumptio n}} = \sum_g \sum_i \{ R_{g,i, \text{Consumptio n}} \times (Q_{g,i, \text{FBS_Food}} - L_{g,i, \text{Distributi on}}) \} \quad (5)$$

流通量および家庭での消費量、摂取熱量については、上記に示した損失量を国内消費仕向量から差し引いて求める。さらに、統計値は重量ベースであるため、熱量換算係数^[3]を用いて熱量に換算する。なお、日本の食料ロスは、式(1)から(5)の変数 g を日本に合わせて固定した式によって算出する。

バイオ燃料の生産量は、式(6)によって算出する。

$$P_{\text{Biofuel_J}} = P_{\text{Bioethanol_L}} \times \text{Ccf}_{\text{Bioethanol}} + P_{\text{Biodiesel_L}} \times \text{Ccf}_{\text{Biodiesel}} \quad (6)$$

P_i, P_L : 生産量 [J/year, l/year]^{[5][6][7]}

Ccf : 換算係数 (LHV) [J/l]^[8]

2.2 食料のサプライチェーンにおけるエネルギーフロー図

IEA^[2]のデータを用いて作成する。需要部門として、食料のサプライチェーンに含まれる部門

(Agriculture/forestry, Fishing, Food and tobacco) のエネルギー消費量を調査する。これを発電構成と熱構成によ

り一次エネルギー換算する。

3. 分析結果と考察

3.1 世界の食料・エネルギーの統合フロー図

図2に2014年の世界の食料とエネルギーの統合フロー図を示す。

まず、食料のマテリアルフローを見ると、年間の食料生産量は60 EJ (10×10^9 t)であった。輸出入量は14 EJ (1.3×10^9 t)、種子用が1.3 EJ (0.2×10^9 t)、飼料用が14 EJ (1.3×10^9 t)、加工用が10 EJ (2.2×10^9 t)である。輸出入量は生産量のおよそ4分の1の量であった。食料として流通しているのは31 EJ (4.4×10^9 t)、消費者にて消費された食料は30 EJである。食料以外の用途（バイオ燃料や石炭など）での消費量は7.9 EJ (0.7×10^9 t)であり、うち2.7 EJがバイオ燃料として消費されている。これは世界の一次エネルギー供給量（TPES）574 EJの0.5%を占める。内訳はバイオエタノールが1.9 EJ、バイオディーゼルが0.8 EJである。摂取熱量は28 EJであり、フードチェーンにおける食料のロス、生産工程で3.3 EJ、収穫後工程で3.0 EJ、加工工程（FAOの統計上で別の食品群に変換される場合のみを考慮している）で0.5 EJ、販売工程で1.0 EJ、消費工程で2.3 EJと推計され、計10 EJである。食料ロスのエネルギー量は世界の一次エネルギー供給量の1.7%に相当する。また、食料ロス10 EJは食料消費量の3分の1の量である。食品群ごとに見ると、まず穀物の生産量は35 EJと食料全体の生産量の半分以上を占めている。うち流通量のおよそ半分が飼料として消費される。バイオ燃料としての消費もされており、損失を除くと摂取熱量は12 EJであった。油料作物は熱量ベースでは生産量が7.9 EJと穀物に次いで大きい。多くが植物油に変換されて消費されるが、輸出入量の割合が大きく、さらに食用以外の消費が大きいという特徴がある。畜産業において、飼料14 EJに対して生産される食料は6.2 EJと小さいが、これは飼料として摂取されたエネルギーの一部は動物の運動エネルギーや熱エネルギーとして消費され、また糞尿として排出される分が存在するため差は発生する。また、人間の食用でない牧草などの熱量は記されていない。世界の人口は7,298,453千人であり⁹⁾、食料の1日の1人あたり摂取熱量は 1.04×10^7 J (2474 kcal)であった。

フードチェーンにおけるエネルギーフロー図を見ると、一次産業にて消費されるエネルギーは8.1 EJ、漁業は0.3 EJ、食品産業で消費されるエネルギーは7.1 EJであった。よって最終エネルギー消費は15 EJであった。一次エネルギー換算すると21 EJで、これは世界の一次エネルギー消費量574 EJの3.7%を占めている。フードチェーンにおけるエネルギー消費のデータの捕捉率を高めるには、流通時や家庭部門でのエネルギー消費量に加えて、農業用肥料製造に伴う間接エネルギーの定量把握が必要となる。

3.2 日本の食料・エネルギーの統合フロー図

図3に日本の食料とエネルギーの統合フロー図を示す。食料のマテリアルフローを見ると、食料生産量は 26×10^2 EJ (54×10^6 t)であった。輸入量は 61×10^2 EJ (55×10^6 t)、輸出量は 1.0×10^2 EJ (1.3×10^6 t)であり、輸入量の割合が大きく、国内生産量の2.4倍のエネルギー量であった。また、食料において世界全体の合計の輸入量に占める日本の輸入量の割合は4.5%であった。国内消費仕向量の内訳として、種子用が 0.2×10^2 EJ (0.3×10^6 t)、飼料用が 23×10^2 EJ (17×10^6 t)、加工用が 14×10^2 EJ (13×10^6 t)である。食料として流通しているのは 53×10^2 EJ (113×10^6 t)、家庭で消費された食料は 52×10^2 EJである。食料以外の用途での消費量は 3.2×10^2 EJ (2.8×10^6 t)であり、うち 1.4×10^2 EJがバイオ燃料として消費されている。これは日本の一次エネルギー供給量18.5 EJの0.08%を占める。内訳はバイオエタノールが 1.4×10^2 EJ、バイオディーゼルが 0.05×10^2 EJである。摂取熱量は 46×10^2 EJであり、フードチェーンにおける食料のロスは 10×10^2 EJである。食料ロスのエネルギー量は日本の一次エネルギー供給量の0.5%にすぎない。日本では、そもそも食料生産量が少なく輸入量

が多いため、食料ロスは比較的少ない。ただし、流通時や家庭内でのロスはその通りではない。食品群ごとに見ると、生産量は、穀物に次いで魚介類の生産量が大きい。世界の食料生産量に占める日本の割合は0.4%であるが、魚介類に関しては4.4%を占めている。また、世界と比較して、日本は肉・魚・卵・乳製品といったタンパク質を多く含む食品の消費量が多いことがわかる。1日の1人あたり摂取熱量は 9.9×10^6 J (2360 kcal)であり、1人あたり摂取熱量は世界平均より少ない。

フードチェーンにおけるエネルギーフロー図を見ると、一次産業にて消費されるエネルギーは 2.1×10^2 EJ、漁業は 2.6×10^2 EJ、食品産業で消費されるエネルギーは 29×10^2 EJであった。一次産業よりも産業部門におけるエネルギー消費量が多いことがわかる。最終エネルギー消費は 33×10^2 EJであった。一次エネルギー換算すると 44×10^2 EJで、これは日本の一次エネルギー供給量18.5 EJの2.4%を占めている。

4. 結言

本研究では、食料とエネルギー需給の現状を調査し、食料とエネルギーのマテリアル・エネルギーフロー図を作成した。持続可能な食料とエネルギーの需給システムを構築するために、以下の特性が明らかとなった。

<世界>

- ・ 年間の食料生産量は60 EJ、輸出入量は14 EJであり、生産量の4分の1が貿易により取引されている。
- ・ 食料のサプライチェーンにおける食料ロスは10 EJである。この値は食料加工時の損失を一部しか考慮できていない。食料ロスは、一次エネルギー供給量574 EJの1.7%、食料消費量の3分の1に相当する。
- ・ 食料由来のバイオ燃料は2.7 EJ生産されており、これは世界の一次エネルギー供給量の0.5%を占める。
- ・ 一次産業と食品加工における最終エネルギー消費は計15 EJ、一次エネルギー換算すると21 EJで、これは世界の一次エネルギー供給量574 EJの3.7%を占めている。フードチェーンにおけるエネルギー消費のデータの捕捉率を高めるには、流通時や家庭部門でのエネルギー消費量に加えて、農業用肥料製造に伴う間接エネルギーの定量把握が必要となる。

<日本>

- ・ 年間の食料生産量は 26×10^2 EJであるのに対し、輸入量は 61×10^2 EJであり、輸入量は生産量の2.4倍に及ぶ。世界全体の合計の輸入量に占める日本の輸入量の割合は4.5%である。
- ・ フードチェーンにおけるエネルギー消費に着目すると、食品産業で消費される割合が著しく大きい。
- ・ 一次産業と食品加工における一次エネルギー供給量は、総供給量18.5 EJの2.4%を占めている。

参考文献

- [1] 農林水産省, 食料自給率とは, http://www.maff.go.jp/j/zyukyu/zikyu_ritu/011.html, (accessed on 28 August, 2017)
- [2] IEA, World Energy Balances, 2016
- [3] FAO, FAOSTAT Statistics Database, Food Balance Sheets, 2017
- [4] FAO, Global food losses and food waste, 2011
- [5] Koizumi Tatsuhi, biofuel and food supply and demand, project research (major country agricultural strategy), 2016
- [6] 三菱総合研究所, 平成28年度石油産業体制等調査研究 (バイオ燃料を中心とした我が国の燃料政策のあり方に関する調査) (バイオエタノール関連) 報告書, 2017
- [7] 日本有機資源協会, バイオディーゼル燃料取組実態等調査の結果概要 (平成26度実績), 2015
- [8] Demirel, Yaşar, Energy, Springer-Verlag London, 2012
- [9] United Nations, World Population Prospects: The 2017 Revision, <https://esa.un.org/unpd/wpp/Download/Standard/Population/>, (accessed on 28 August, 2017)